

Выводы. Полученные теоретические результаты были подтверждены практически при измельчении металлических порошков и их композиций на вибрационных машинах типа ВУПП-200.

Список литературы: 1. Овчинников П.Ф. Виброреология / П.Ф. Овчинников. – К.: Наукова Думка, 1983. – 271 с. 2. Орлова Н.Д. О некоторых оценках результатов вибрационного измельчения материалов / Н.Д. Орлова // Вісник НТУ «ХПИ». – 2007. – № 31. – С. 120 – 127. 3. Овчинников П.Ф. Влияние характера движения на укладку шаров во вращающейся емкости / П.Ф. Овчинников, Н.Д. Орлова // Доклады АН УССР. – 1979. – № 1. – С. 31 – 36. 4. Иванова В.С. Усталостное разрушение металлов / В.С. Иванова. – М: Металлургиздат, 1963. – 272 с. 5. Орлова Н.Д. Роль ударного и истирающего воздействия мелющих тел при вибрационном измельчении металлических порошков / Н.Д. Орлова // Сучасне судноплавство і морська освіта: міжнар. наук.-техн. конф.: матеріали. – 2004. – Ч. 2. – С. 171 – 174. 6. Орлова Н.Д. Результаты вибрационного измельчения сплава никель-алюминий-титан / Н.Д. Орлова // Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка технологии виброизмельчения металлических порошков для коррозионно-стойких и антифрикционных покрытий», № 01860062335. – 1988. – С. 33 – 37. 7. Орлова Н.Д. Вибрационное измельчение стружки бронзы / Н.Д. Орлова, Н.В. Светельщук // Деп. ЦНИИЭМ цветных металлов 9.04.90, № 1893-цм 8. Францевич И.И. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов / И.И. Францевич, Ф.Ф. Воронов, С.А. Бакута. – К.: Наукова Думка, 1982. – 356 с.

Надійшла до редколегії 25.07.11

УДК 531-531.3

А.В. АНЦИФЕРОВ, канд. техн. наук, доц.

Государственный ВУЗ «Национальный горный университет», Днепропетровск

ВИБРОУДАРНАЯ СИСТЕМА С УПРУГИМ ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Проведено дослідження віброударної системи, що моделює процес руйнування шару матеріалу у вертикальному вібраційному млині. У вихідні рівняння уведено час ударної взаємодії. Наведені вирази, що пов'язують даний параметр з механічними властивостями шару. Урахування часу удару дає можливість уточнити окремі параметри на 20 – 30 %.

Проведены исследования виброударной системы, которая моделирует процесс разрушения слоя материала в вертикальной вибрационной мельнице. В исходные уравнения введено время ударного взаимодействия. Приведены выражения, что связывают данный параметр с механическими свойствами слоя. Учет времени удара дает возможность уточнить отдельные параметры на 20 – 30 %.

The research of the vibroimpact system, modeling the process of material layer destruction in a vertical vibration mill, is conducted. The time of impact interaction is added the initial equations. Epy expressions, linking the parameter given with the layer mechanical properties, are shown. Taking in to consideration impact time gives the possibility to specify some parameters on 20 – 30 %.

Существуют два подхода для динамического расчета вертикальных вибрационных мельниц (МВВ). В первом мельница рассматривается как вибрационная система с несколькими элементами, соединенными упруго-вязкими связями [1]. Этот метод позволяет построить амплитудно-частотную характеристику машины. История развития второго подхода следующая.

Экспериментальные исследования по измельчению различных материалов показали существование виброударного режима взаимодействия помольной камеры с технологической загрузкой внутри нее (как правило шаровые мелющие тела) [2]. Для расчета технологических параметров, реализующих виброударный режим был предложен подход с позиций теории виброударных систем [3].

В работе [3] приняты два допущения: пренебрежение временем ударного взаимодействия и замена технологической загрузки единичной массой. Но данный подход при построении динамической модели МВВ будет, по видимому, достаточно грубым. Количество загружаемого в помольную камеру МВВ материала образует слой, толщина которого соизмерима с размером мелющего тела. Кроме того, измельчаемый материал хоть и находится в виброоживленном состоянии, но занимает придонный объем камеры. Таким образом ударное взаимодействие технологической загрузки с днищем происходит через слой порошкового материала. Удар с крышкой также не идеальное. В процессе движение шаров от днища к крышке и обратно происходит их «разжижение», что увеличивает время удара. Обоснование подхода с учетом времени ударного взаимодействия элементов виброударной системы и дано в этой работе.

Математическая модель. Для решения задачи используем теорию виброударных систем, а в процессе удара воспользуемся методами теории упругости и классической теории удара. Считаем помольную камеру K и технологическую загрузку $З$ в виде единичной массы абсолютно жесткими телами. Камера совершает гармонические колебания с амплитудой a и частотой ω . Ударное взаимодействие на закон движения камеры не влияет. Днище и крышка снабжены упругими элементами УЭ, деформации которых определяют время удара. Выражения для расчета параметров удара даны в [4].

Пусть сопротивление промежуточного элемента пропорционально сжатию, т.е. зависимость силы от сжатия имеет вид:

$$N = C\alpha, \quad (1)$$

где C – жесткость эквивалентной пружины.

Случай имеет место, если упругий элемент выполнен в виде пружины, относительно мягкой прокладки или выступа с линейной характеристикой.

Закон изменения силы ударного взаимодействия во времени определяется выражением:

$$N = u_0 \sqrt{C \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \sin \sqrt{C \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}} t, \quad (2)$$

где u_0 – скорость соударения масс m_1 и m_2 .

Время первой фазы удара (сжатие) определяется выражением:

$$t_y = \pi \sqrt{\frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2) C}}. \quad (3)$$

Критерий применимости формул (2) и (3) для рассматриваемой ударной системы из (4) определяется условием:

$$\beta = \frac{t_{y0}}{T} > 3 - 5, \quad (4)$$

где $T = 2L/a$ – наибольший период собственных колебаний соударяющихся тел; L – длина тела; a – скорость распространения в нем продольной волны.

Фазу удара мы делим на две части. Первая – сжатие мелющим телом слоя порошка, при котором происходит разрушение частиц слоя. Он описывается уравнениями (2) – (3), полученными из выражений теории упругости. Вторая фаза – отскок мелющего тела. Здесь пользуемся классической теори-

ей удара, по которой скорость отскока зависит от скорости соударения камеры и загрузки и коэффициента восстановления скорости.

Жесткость деформируемого слоя порошка, время удара и коэффициент восстановления скорости зависят от толщины слоя и могут быть определены экспериментально [5].

Расчетная схема представлена на рис. 1.

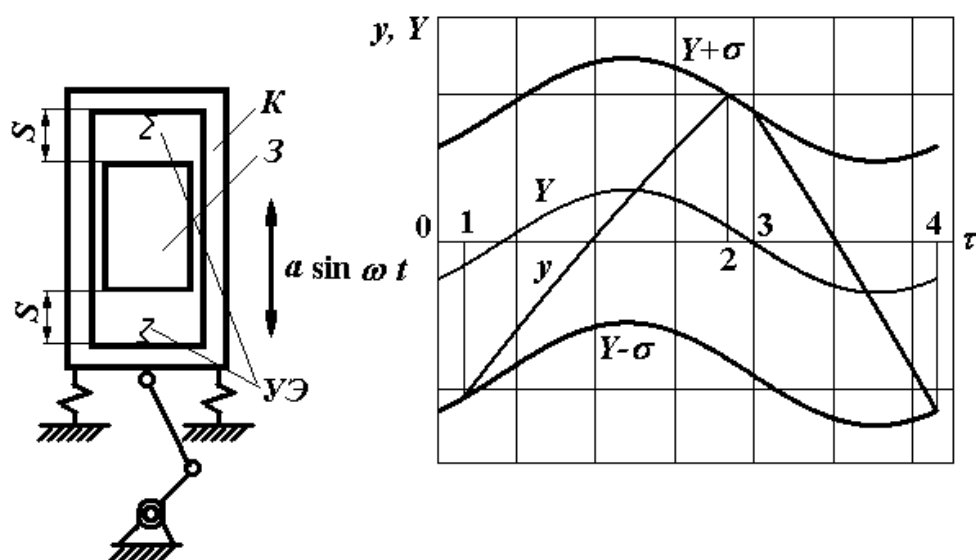


Рис. 1. Расчетная схема

Координаты средних точек камеры и массы Y и y соответственно.

Отсчет ведем от среднего положения камеры. Начало отсчета времени принимаем в точке 0, в момент соударения загрузки с дном камеры. Зазор между загрузкой и крышкой камеры в статическом положении $2S$. Задачу решаем в безразмерных величинах, для чего принимаем следующие обозначения:

$$y = \frac{\omega^2}{g} y^*, Y = \frac{\omega^2}{g} Y^*, \Gamma = \frac{a\omega^2}{g}, \tau = \omega t, \sigma = \frac{\omega^2}{g} S. \quad (5)$$

Звездочки при величинах показывают то, что они размерные. Таким образом, уравнение движения камеры имеет вид:

$$Y = \Gamma \sin(\tau + \varphi), \quad (6)$$

где φ – фазовый угол соударения массы с дном камеры.

Уравнение движения массы на участках свободного полета 1 – 2 и 3 – 4:

$$y = -\frac{1}{2} \tau^2 + C_{1\pm} \tau + C_{2\pm} \quad (7)$$

Знаки плюс в индексах постоянных соответствуют интервалу движения массы с положительной скоростью вверх, знаки минус – движению вниз.

Обозначим время удара при контакте с днищем $\tau_{уд}$ и крышкой $\tau_{ук}$.

Тогда координаты середины камеры и ее днища в конце удара (точка 1):

$$Y_1 = \Gamma \sin(\tau_{уд} + \varphi), \quad Y_{1д} = \Gamma \sin(\tau_{уд} + \varphi) - \sigma, \quad (8)$$

Скорость удара загрузки о днище в точках 0 и 2 (см. рис. 1) обозначим u_0 и u_2 . Для определения скоростей отскока в точках 1 и 3 вводим коэффициенты восстановления скорости при ударе о днище и крышку R_d и R_k .

Для учета потери энергии на сжатие упругого элемента мелющим телом расчетные скорости удара в точках 0 и 2 принимаем с коэффициентом k :

$$u_{0p} = k u_0, \quad u_{2p} = k u_2, \quad \text{где } k = 0,7 - 0,9. \quad (9)$$

Согласно расчетной схеме из (7) и второго уравнения (8):

$$C_{2+} = \Gamma \sin(\tau_{уд} + \varphi) - \sigma. \quad (10)$$

Согласно принятому условию (9) уравнение удара для точки 1 (конец ударного взаимодействия на участке 0 – 1):

$$v_1 - \Gamma \cos(\tau_{уд} + \varphi) = -R_d [u_{0p} - \Gamma \cos(\tau_{уд} + \varphi)]. \quad (11)$$

Из (11) получаем выражение для v_1 в точке 1 на участке свободного полета 1 – 2. Из (7) на участке 1 – 2 скорость загрузки определяется как:

$$\dot{y}_{1-2} = -\tau + C_{1+}. \quad (12)$$

Тогда в точке 1 с учетом (11) и (12) имеем:

$$\dot{y}_1 = v_1 = -\tau_{уд} + C_{1+}. \quad (13)$$

После преобразований из (11) и (13) получаем:

$$C_{1+} = -R_d [u_{0p} - \Gamma \cos(\tau_{уд} + \varphi)] + \Gamma \cos(\tau_{уд} + \varphi) + \tau_{уд}. \quad (14)$$

Аналогично (11) согласно принятому условию (9) уравнение удара для точки 3 (конец ударного взаимодействия на участке 2 – 3):

$$v_3 - \Gamma \cos(\tau_3 + \varphi) = -R_k [u_{2p} - \Gamma \cos(\tau_3 + \varphi)]. \quad (15)$$

Из (7), (10), (14) и (15) для постоянных интегрирования на участке 3 – 4:

$$C_{1-} = -R_k \left\{ k \left[-\tau_2 + \left[-R_d (ku_0 - \Gamma \cos(\tau_{уд} + \varphi)) + \Gamma \cos(\tau_{уд} + \varphi) + \tau_{уд} \right] - \right. \right. \quad (16)$$

$$\left. \left. - \Gamma \cos(\tau_3 + \varphi) \right\} + \Gamma \cos(\tau_3 + \varphi) + \tau_3,$$

$$C_{2-} = \Gamma \sin(\tau_3 + \varphi) + \sigma -$$

$$- \left\{ k \left[-\frac{1}{2} (\tau_2 + \tau_{ук})^2 + \left[-R_k \left[k(-\tau_2 + (-R_d (ku_0 - \Gamma \cos(\tau_{уд} + \varphi)) + \Gamma \cos(\tau_{уд} + \varphi) + \tau_{уд})) \right] \right] \right. \right. \quad (17)$$

$$\left. \left. - \Gamma \cos(\tau_3 + \varphi) + \Gamma \cos(\tau_3 + \varphi) + \tau_3 \right] (\tau_2 + \tau_{ук}) \right\},$$

где $\tau_3 = \tau_2 + \tau_{ук}$.

Из условий периодичности скорость удара загрузки о днище в момент времени 2π равна скорости удара в момент времени $\tau = 0$. Аналогично (12) и (13) для точки 4 можно записать:

$$\dot{y}_4 = u_0 = -2\pi + C_{1-}. \quad (18)$$

Координаты загрузки и днища в момент времени 2π равны, откуда со-

ставим выражение для нахождения момент времени τ_2 . Численное значение τ_2 подставляем в (18) для нахождения u_0 . Эффективность измельчения материала определяется результирующей скоростью удара загрузки и камеры:

$$v_{\text{уд}} = \Gamma \cos \varphi - u_0. \quad (19)$$

Пример расчета. Рассмотрим один период движения камеры и массы при следующих параметрах: $R_d = 0,6$; $R_k = 0,35$; $\Gamma = 7$, $k = 0,9$. Для различных значений фазового угла φ определялись значения σ и τ_2 , соответствующие траектории загрузки с участком 2 – 3 в контакте с крышкой (рис. 1). Далее вычисляется скорость соударения загрузки с днищем. Данные представлены на рис. 2.

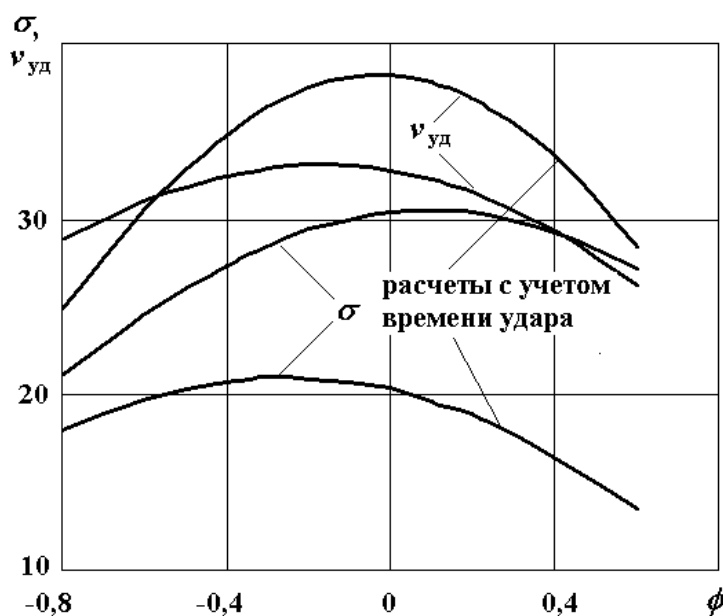


Рис. 2. Результаты расчета

Кривая $v_{\text{уд}}$ имеет экстремальный характер. По ее максимуму должен подбираться параметр σ . Для сравнения на графике показаны аналогичные кривые, полученные без учета времени соударения.

Выводы. Учет времени удара для рассмотренной модели MBV показывает уменьшение величины зазора в диапазоне 15 – 60 % исследованной фазы соударения угла φ . Для реализации максимальной скорости соударения необходимо уменьшение величины технологического зазора 30 %. В качестве дальнейших задач исследования необходимы экспериментальные исследова-

ния по подтверждению полученных зависимостей. В теоретическом плане необходимо учесть влияние виброожижения материала на время ударного взаимодействия.

Список литературы: 1. Франчук В.П. Конструкция и динамический расчет вибрационных мельниц / В.П. Франчук // Техника и технология обогащения руд. – М: Недра, 1995. – С. 143 – 160. 2. Анциферов А.В. Экспериментальное исследование поведения многомассной системы внутри камеры с вертикальным направлением вибрации / А.В. Анциферов // Вісник НТУ«ХП». – 2006. – № 30. – С. 42 – 49. 3. Анциферов А.В. Симметричная двухмассная модель помольной камеры MBV / А.В. Анциферов // Вибрации в технике и технологиях. – 1998. – № 4 (8). – С. 55 – 57. 4. Александров Е.В. Прикладная теория и расчеты ударных систем / Е.В. Александров, В.Б. Соколински . – М.: «Наука», 1969. – 197 с. 5. Анциферов А.В. Экспериментальное исследование соударения тел через слой порошкового материала / А.В. Анциферов, И.В. Комарова // Вісник НТУ «ХП». – 2010. – № 66. – С. 58 – 63.

Поступила в редколлегию 26.07.11

УДК 532.5.536.2

В.П. НАДУТЫЙ, докт. техн. наук, зав. отделом, ИГТМ НАНУ
В.И. ЕЛИСЕЕВ, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотруду., ДНУ
В.И. ЛУЦЕНКО, канд. техн. наук, ст. научн. сотруду., ИГТМ НАНУ
И.П. ХМЕЛЕНКО, канд. техн. наук, мл. научн. сотруду.,
ИГТМ НАНУ, Днепропетровск

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ НА СТАТИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ МЕНИСКА ДВИЖУЩЕЙСЯ В КАПИЛЛЯРЕ ЖИДКОСТИ

Розглянута задача впливу низькочастотних вібрацій на рух рідини в капілярі із шорсткуватими стінками. Отримано, що енергія коливань допомагає меніску рідини переборювати мікроскопічні перешкоди і після закінчення руху меніск займає положення близьке до положення, що відповідає рівноважному куту змочування. Показана можливість резонансного збудження меніска в капілярі при коливаннях рідини.

Рассмотрена задача воздействия низкочастотных вибраций на движение жидкости в капилляре с шероховатыми стенками. Получено, что энергия колебаний помогает мениске жидкости преодолевать микроскопические преграды и по окончании движения мениск занимает положение близкое к положению, что соответствует равно-важно углу смачивания. Показана возможность резонансного возбуждения мениска в капилляре при колебании жидкости.